

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРЯМОГО МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫМ ПОЗИЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

В.П.Войтенко, А.Ю.Сорокин

Черниговский технологический институт

Украина, 250027, г. Чернигов, ул. Шевченко, 95, ЧТИ, кафедра "Промышленная электроника"

Тел. (04622) 3-77-17, E-mail: vvp@pe.ti.chernigov.ua

Annotation – it is considered the possibilities of using of the direct microprocessor control for the precise actuator.

Key words – motion control. microcontroller. electric drive. linear movement. mechatronics.

Рост степени интеграции и создание однокристалльных микроконтроллеров (ОМК) со встроенным набором специализированных периферийных устройств (АЦП, ШИМ и др.) дают возможность создавать системы прямого микропроцессорного управления (СПМУ) электроприводом. При этом реализуется ввод в ОМК сигналов обратной связи (как дискретных, так и аналоговых), а также непосредственное управление ключами силового преобразователя, т.е. создание одноплатных контроллеров управления приводами. В пределе СПМУ, силовой преобразователь и двигатель интегрируются в единое целое – мехатронный модуль движения.

При проектировании системы управления электроприводом прецизионного линейного перемещения необходимо учитывать множество различных факторов, таких, как влияние сухого и вязкого трения, возникновения задержки момента трогания относительно управляющего импульса, нелинейные зависимости конструктивных параметров привода, ограничения на уровни управляющих воздействий, а также эффекты квантования управляющих сигналов ОМК. Важнейшей предпосылкой создания СПМУ перемещением является выбор быстрого алгоритма с ограниченным объемом требуемых вычислений и памяти.

Уравнение, связывающее перемещение (координату) подвижной части двигателя (каретка и присоединенная масса) с величиной управляющего тока с учетом сухого трения в опорах (при условии, что трение возникает без скачка) и вязкого трения (при условии ламинарного процесса обтекания газом подвижной части) имеет вид:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + K_{WTR} \frac{dx}{dt} + F_{STR} \operatorname{sgn} \left(\frac{dx}{dt} \right) = i(t)K, \quad (1)$$

где m – масса подвижной части, кг;

K – коэффициент силы двигателя, Н/А;

K_{WTR} – коэффициент демпфирования, Н·с/м;

F_{STR} – сила сухого трения, Н;

i – управляющее воздействие, А;

x – координата подвижной части, м.

Управляющее напряжение и ток через обмотку двигателя связаны уравнением электрической цепи:

$$u = L \frac{di}{dt} + Ri + C \frac{dx}{dt}, \quad (2)$$

где L – индуктивность обмотки, Гн;

R – активное сопротивление обмотки, Ом;

C – коэффициент противоЭДС, В·с/м;

i – ток через обмотку, А;

u – напряжение на обмотке, В.

Примем, что процесс позиционирования совершается при нулевых начальных условиях (скорости, ускорения, тока в обмотке) и без перерегулирования (т.е. скорость не изменяет знак). Рассмотрим два этапа с момента подачи напряжения на обмотку.

1) $0 \leq t \leq t_1$ – интервал нарастания тяги двигателя до величины силы трения покоя. Определяет задержку возникновения скорости подвижной части при подаче на обмотку управляющего импульса напряжения. Момент трогания подвижной части t_1 можно найти из системы уравнений

$$\left. \begin{aligned} U &= L \frac{di}{dt} + Ri \\ F_{STR} &= i(t)K \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

где U – напряжение на обмотке.

Из (3) следует

$$t_1 = -\frac{L}{R} \ln \left(1 - \frac{F_{STR} R}{KU} \right). \quad (4)$$

2) $t > t_1$ – сила сухого трения остается постоянной. Действие силы тяги двигателя направлено на преодоление сухого и вязкого трения при перемещении подвижной части ($dx/dt > 0$) вплоть до окончания процесса позиционирования и начала работы системы стабилизации положения.

Таким образом, для $t > t_1$, можно считать $\operatorname{sgn} \left(\frac{dx}{dt} \right) = 1$. Выполняя преобразование Лапласа над (1) и (2), получаем

$$mp^2 X(p) + K_{WTR} pX(p) + \frac{F_{STR}}{p} = KI(p); \quad (5)$$

$$U(p) = pLI(p) + RI(p) + CpX(p). \quad (6)$$

Решая совместно уравнения (5) и (6) относительно $X(p)$ с учетом задержки трогания, получаем:

$$X(p) = \frac{\left(\frac{KU(p)}{pL + R} - \frac{F_{STR}}{p} e^{-pt_1} \right)}{p^2 M + pF_{WTR} + \frac{pKC}{pL + R}}. \quad (7)$$

Выражение (7) можно привести к виду

$$X(p) = \frac{U(p) - U_{STR}(p)e^{-pt_1}}{p(p - p_1)(p - p_2)}, \quad (8)$$

$$\text{где } U_{STR}(p) = \frac{(pL+R)F_{STR}}{pK} - \text{напряжение,}$$

прикладываемое к обмотке двигателя для компенсации сухого трения при движении подвижной части (при $t > t_1$);

$p_{1,2}$ — полюса выражения (7).

Согласно [1] для объекта, имеющего передаточную функцию 3-го порядка (8) оптимальный цифровой регулятор должен сформировать три импульса, изображение по Лапласу которых:

$$U(p) = m_0(1 - e^{-hp}) - m_1(e^{-hp} - e^{-2hp}) + m_2(e^{-2hp} - e^{-3hp}), \quad (9)$$

где h_0 — шаг дискретизации регулятора;

$$m_0 = K_0; m_1 = K_0 b_1; m_2 = K_0 b_2;$$

$$K_0 = \frac{P_1 P_2}{h\alpha \cdot (1-A)(1-B)};$$

$$A = e^{p_1 h}; B = e^{p_2 h};$$

$$b_1 = -(A+B); b_2 = AB; \alpha = \frac{K}{mL}. \quad (10)$$

Поскольку до момента трогания нарастающий ток не приводит к движению, при описании управляющего напряжения необходимо последнее задерживать на t_1 . Для компенсации действия сухого трения при движении формируется дополнительная ступенька U_{STR} в соответствии с (11):

$$U(p) = m_0(e^{-pt_1} - e^{-p(h+t_1)}) - m_1(e^{-p(h+t_1)} - e^{-p(2h+t_1)}) + m_2(e^{-p(2h+t_1)} - e^{-p(3h+t_1)}) + U_{STR}(p)e^{-pt_1}. \quad (11)$$

Длительность шага дискретизации цифрового регулятора h в зависимости от необходимого перемещения вычисляется путем решения трансцендентного уравнения (12), которое составлено с учетом ограничений на управляющее воздействие E_{max} , т.е. оптимальна по быстродействию для объекта 3-го порядка:

$$\frac{P_1 P_2}{h\alpha(1-A)(1-B)} = \frac{E_{max}}{x}. \quad (12)$$

Поскольку амплитуда воздействия на третьем шаге дискретизации для реальных объектов m_2 значительно меньше, чем m_0 и m_1 , то, допуская некоторое снижение точности для возможности более быстрого позиционирования, перемещение можно осуществлять за два шага, т.е. формировать воздействие:

$$U(p) = m_0(e^{-pt_1} - e^{-p(h+t_1)}) - m_1(e^{-p(h+t_1)} - e^{-p(2h+t_1)}) + U_{STR}(p)e^{-pt_1}. \quad (13)$$

Подставляя в (8) $U(p)$ из (11) или из (13) и выполнив обратное преобразование Лапласа, определим

координаты к концу этапа позиционирования для трехимпульсного (x_3) и двухимпульсного (x_2) управления. Зависимость абсолютной ошибки позиционирования $y = x_3 - x_2$ (мкм) от величины требуемого перемещения x (мкм) представлена на рис. 1. В численном расчете использованы параметры линейного электродвигателя постоянного тока для стенда разметки жестких магнитных дисков.

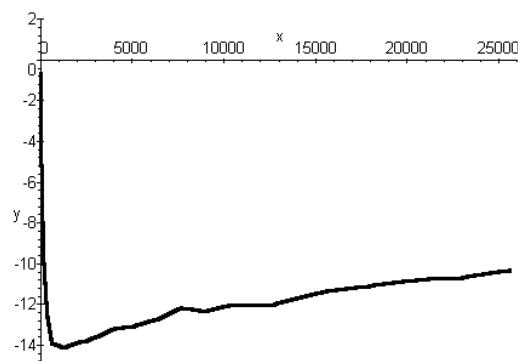


Рис. 1

Из рис. 1 следует, что исключение 3-го импульса из процесса регулирования приводит к ошибке позиционирования, которая далее должна быть устранена системой стабилизации (слежения). Полученные данные позволяют сформулировать некоторые требования к этой системе: зона захвата системы стабилизации (слежения) должна быть не менее $\max(y)$. Учитывая высокое (до сотен м/с^2) предельное ускорение, развиваемое двигателем, систему позиционирования целесообразно выполнять одноступенчатой [2].

При использовании методов широтно-импульсной модуляции для формирования управляющих воздействий необходимо учитывать конечность периода ШИМ. На рис. 2 представлена зависимость абсолютной ошибки для случая 8-ми разрядной ШИМ с периодом 20...32 мкс, характерной для боль-

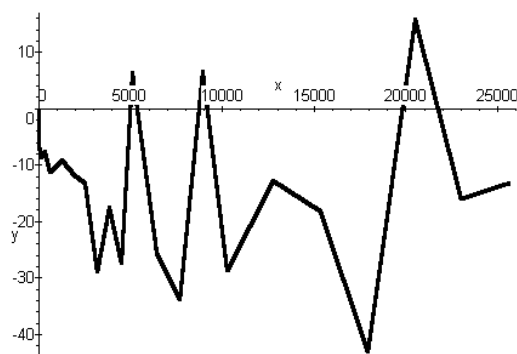


Рис. 2

шинства современных ОМК (i8xC196, ADMC3xx, C166). Очевиден существенный рост ошибки, превышающий влияние одного лишь исключения 3-го импульса. Поэтому для ШИМ-систем основное внимание придется уделить вопросу повышения частоты ШИМ

и увеличения разрядности формирователей длительности импульсов.

Вычисление в реальном времени h по (12) предъявляет высокие требования к быстродействию ОМК (от 200 до 500 мкс в зависимости от типа ОМК и метода решения), поэтому целесообразно оценить возможности других алгоритмов быстрого и точного позиционирования.

Для упрощения вычисления шага h в зависимости от необходимой величины перемещения предположим, что процесс позиционирования необходимо выполнить за два равных по времени шага (разгон и торможение), а форма траектории движения должна стремиться к форме траектории движения модели второго порядка (14) при управлении импульсами тока (15):

$$S(p) = I(p) \frac{K}{p^2 m}; \quad (14)$$

$$I(p) = I \left(\frac{1}{p} - \frac{2e^{-hp}}{p} + \frac{e^{-2hp}}{p} \right). \quad (15)$$

Тогда изображение по Лапласу эталонной траектории

$$S(p) = \frac{K}{p^2 m} I \left(\frac{1}{p} - \frac{2e^{-hp}}{p} + \frac{e^{-2hp}}{p} \right). \quad (16)$$

Перемещение S за два шага дискретизации h при постоянной величине a ускорения и торможения составит:

$$S = ah^2 = \frac{K \cdot I}{m} h^2. \quad (17)$$

В результате исключения из передаточной функции индуктивной составляющей [3] и совместного решения уравнений (5), (6) относительно $U(p)$, находим

$$U(p) = X(p) \left[\frac{R}{K} (mp^2 + K_{WTR} p) + Cp \right] + \frac{F_{STR} R}{pK}. \quad (18)$$

Заменяя в (18) $X(p)$ на $S(p)$ из (16), получаем выражение для изображения управляющего напряжения

$$U(p) = \frac{K}{p^2 m} I \left(\frac{1}{p} - \frac{2e^{-hp}}{p} + \frac{e^{-2hp}}{p} \right) \times \left[\frac{R}{K} (mp^2 + K_{WTR} p) + Cp \right] + \frac{F_{STR} R}{pK} \quad (19)$$

или

$$U(p) = I \left(\frac{1}{p} - \frac{2e^{-hp}}{p} + \frac{e^{-2hp}}{p} \right) \times \left[R + \frac{RK_{WTR} p + KC}{pm} \right] + \frac{F_{STR} R}{pK}. \quad (20)$$

Шаг дискретизации h , в зависимости от необходимой координаты S , находим из (17)

$$h = \sqrt{\frac{S \cdot M}{K \cdot I}}. \quad (21)$$

Сдвинув моменты коммутации напряжения аналогично (11), вычисленное управляющее воздействие $U(p)$ (20) подставим в (7).

Зависимость абсолютной ошибки позиционирования y (мкм) системы, описываемой выражением (8) при формировании напряжения управления по (20), где h найдено по (21) от величины перемещения x (мкм) представлена на рис. 3.

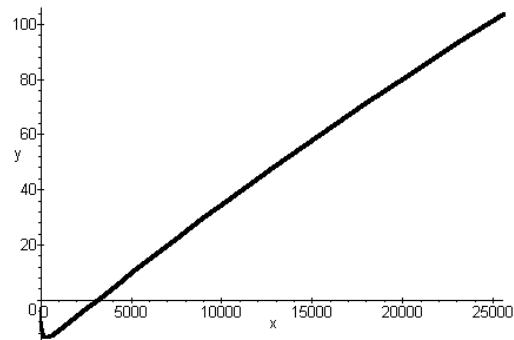


Рис. 3

Зависимость абсолютной ошибки с учетом эффекта квантования управляющих сигналов ОМК по длительности представлена на рис. 4

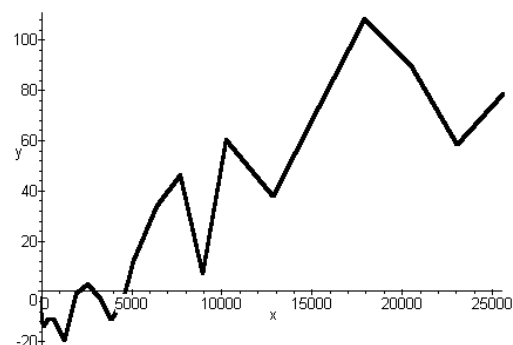


Рис. 4

Вычисление выражения (21) производится численным методом Ньютона решения нелинейных уравнений. При заданной погрешности вычислений $\Delta h = 2$ мкс вычисление осуществляется за 5...7 итераций. Реализация расчета на i8x196, например, потребует время счета 20...50 мкс).

При равных допустимых значениях тока через обмотку оба метода расчета управляющих воздействий (по (12) и (21)) с точки зрения величины h равновалены по времени установления системы и остаточной скорости в момент окончания позиционирования (0,01..0,03 м/с).

Как показало численное моделирование, несмотря на более грубые допущения во втором методе расчета (21), формирование длительности импульса с точностью порядка 10 мкс для двигателя с электрической постоянной времени $T_e=0,5$ мс и механической постоянной $T_m=50$ мс приводит в обоих случаях к аналогичным по величине погрешностям (см рис. 2 и 4).

При повышении температуры обмотки двигателя, выполненной из медного провода, на 25К ее активное сопротивление увеличится в 1,1 раза, что приведет к значительному возрастанию абсолютной ошибки позиционирования (рис. 5).

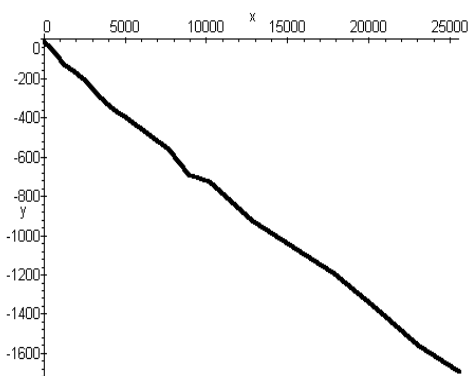


Рис. 5

Учет влияния на точность позиционирования нелинейных зависимостей, таких, как [3,4,5]:

- индуктивности обмотки от положения подвижной части;
- неоднородности, несимметричности распределения магнитного поля в зазоре, насыщения магнитной цепи;
- активного сопротивления при больших уровнях управляющего воздействия;
- величины сухого трения и коэффициента вязкого трения от скорости перемещения подвижной части;
- скачка трения при переходе от покоя к движению приводит к значительному усложнению алгоритма вычисления управляющих воздействий. Однако, вследствие индивидуальных различий этих зависимостей для каждого конкретного образца двигателя, усложнение алгоритма не позволит добиться существенного возрастания точности позиционирования.

Сила трения определяет статическую ошибку следящей системы, а ее скачки и изменение снижают плавность при малых скоростях движения. Следовательно, необходима реализация следующих мер [4]:

- улучшение характеристик $F_{tr}=f(v)$ в направляющих;

- применение антискачковых смазок, а для прецизионных приводов – газовой смазки;
- снижение влияния сил трения малыми осциллирующими движениями.

Поскольку эти меры зависят от типа и конструктивного исполнения электродвигателя, то целесообразно использовать таблицу адаптивно изменяемых в процессе работы корректирующих коэффициентов для амплитуды и длительности управляющих воздействий в зависимости от возмущающих факторов.

Выводы

1. Учет сухого трения в прецизионной системе позволяет снизить ошибки позиционирования, связанные с задержкой механических координат (x, v, a) на величину, определяемую из соотношения (4).
2. Недостаточная скорость вычислений шага дискретизации и высокая дискретность квантования по длительности импульсов в широко применяемых микроконтроллерах определяет необходимость поиска простых зависимостей управляющих воздействий от координаты. Для быстродействующих систем точного позиционирования возможно использование выражения (21).
3. Решающими факторами, наиболее сильно влияющими на точность позиционирующей системы, оказываются изменения конструктивных параметров двигателя. Упрощение регулирующего воздействия за счет отказа от третьего шага и упрощение расчета длительности шага вполне целесообразно, поскольку вносит существенно меньшие ошибки. Далее потребуются корректировка расчетных выражений в процессе работы и введение замкнутой системы стабилизации – слежения с широкой зоной захвата.
4. Применение быстродействующих контроллеров (TMS320xxx, Altera) позволяет разрабатывать замкнутые по дополнительным координатам (скорости, ускорению) системы позиционирования с элементами адаптации к изменению параметров, как самой электромеханической части, так и окружающей среды.

[1] Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами: Справочник. – К.:Тэхника, 1990. – 280с.

[2] Оптико-механические запоминающие устройства /Петров В.В., Крючин А.А., Токарь А.П., Шанойло С.М., Сандул В.Я.: Отв. ред. Додонов А.Г.; АН Укранины. Ин – т проблем регистрации информации. – Киев: Наук. думка, 1992. – 152 с.

[3] Выхуб В.Г. Прецизионные цифровые системы автоматического управления / В.Г.Выхуб, Б.С. Розов, В.И.Савельев. – М.:Машиностроение, 1984. – 136.

[4] Кочергин В.В. Следящие системы с двигателем постоянного тока. – Л.: Энергоатом издат. Ленингр. отд – ние, 1988. – 168с.

[5] Алдошина И.А. Электродинамические громкоговорители. –М.: Радио и связь, 1989. –272с.